

A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?

Pedro Sérgio Landim de Carvalho

Pedro Paulo Dias Mesquita

Marco Aurélio Ramalho Rocio

A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?

Pedro Sérgio Landim de Carvalho

Pedro Paulo Dias Mesquita

Marco Aurélio Ramalho Rocio*

Resumo

Este artigo tem o propósito de apresentar um quadro da indústria de geração de energia fotovoltaica no mundo e no Brasil e, em particular, da produção de seu principal insumo, o silício cristalino em grau solar (SiGS), com o qual se produzem as células fotovoltaicas. Inicialmente, apresentam-se as características e a ocorrência do silício e suas principais aplicações, enfatizando sua utilização na produção de módulos fotovoltaicos. Em sequência, discorre-se sobre a produção e o mercado global tanto de energia fotovoltaica quanto de SiGS. São feitas considerações sobre a viabilidade da produção, no Brasil, de SiGS pela rota metalúrgica, para suprimento do mercado interno e para que possa vir a ser um fornecedor em nível mundial, bem como para incentivar e ampliar o uso da energia fotovoltaica no país. Por fim, apresenta-se o papel que o BNDES pode desempenhar no estímulo ao desenvolvimento e fortalecimento da produção doméstica desse insumo.

* Respectivamente, gerente, economista e geólogo do Departamento de Indústria de Base da Área de Insumos Básicos do BNDES. Os autores agradecem a colaboração do pesquisador João Batista Ferreira Neto, do Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), e da Companhia Ferroligas de Minas Gerais (Minasligas).

O silício e suas aplicações

Silício

O silício, de símbolo Si, é um elemento químico pertencente ao grupo 14 (IV-A) da Classificação Periódica dos Elementos, de número atômico 14 (14 prótons e 14 elétrons) e com massa atômica igual a 28 u. À temperatura ambiente, encontra-se no estado sólido. Apresenta-se tanto na forma amorfa quanto na forma cristalina, em estrutura octaédrica, de coloração azul acinzentado e brilho metálico. É um elemento relativamente inerte e resistente à ação da maioria dos ácidos, mas reage com halogênios e bases. O silício transmite mais de 95% dos comprimentos de onda das radiações infravermelhas. Está presente em minerais como as argilas, os feldspatos e o quartzo, normalmente na forma de dióxido de silício ou sílica (SiO_2) e de silicatos (compostos contendo silício, oxigênio e metais). É o principal componente do vidro, do cimento e da cerâmica, da maioria dos componentes semicondutores eletrônicos e dos silicões.

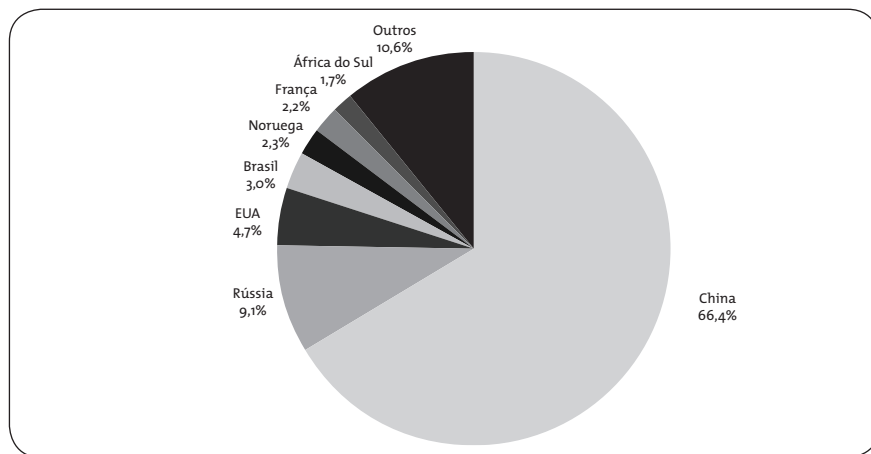
Industrialmente, a produção de silício se dá na forma de silício metálico (metalúrgico) ou na forma de liga ferrossilício. A liga ferrossilício responde por cerca de 94% da produção de silício, com base no peso, e por cerca de 75% em conteúdo de silício. Os maiores produtores mundiais de ferrossilício são China, Rússia, Estados Unidos da América (EUA), Brasil e Ucrânia. Em termos de silício metalúrgico, os maiores produtores são, respectivamente, China, Brasil, EUA, França e Noruega.

A produção mundial de silício metalúrgico somada à de silício contido na liga ferrossilício foi de 7.700 mil toneladas, em 2013. O Gráfico 1 apresenta a participação dos principais produtores na produção mundial de silício (metalúrgico e contido em ferrossilício) nesse ano.

Apesar de ser um dos maiores produtores mundiais, o Brasil, com uma produção de 170 mil toneladas em 2013, apresentou queda de cerca de 19% em relação ao ano anterior.

Cabe observar que o silício metalúrgico é a matéria-prima para a produção do silício cristalino, usado na produção de células fotovoltaicas, que representa atualmente entre 8% a 10% do total do consumo do silício metalúrgico.

Gráfico 1 | Participação dos principais países produtores na produção mundial de silício, 2013



Fonte: USGS (2014).

Ocorrência na natureza

O silício não é encontrado no estado nativo; apenas seus compostos podem ser encontrados na natureza. É o segundo elemento mais abundante e perfaz mais de 28% da massa da crosta terrestre. Em abundância, fica atrás apenas do oxigênio, que compõe quase a metade da crosta. Na água do mar, sua concentração é relativamente baixa, com apenas três miligramas por litro. No espaço, pode-se encontrar um átomo de silício para cada 30 mil átomos de hidrogênio.

O principal componente mineral em que o silício está presente, e principal fonte de exploração, é o quartzo (SiO_2), um dos mais abundantes minerais da crosta. O elemento está presente ainda nos minerais de argila, como a caulinita (silicato de alumínio hidratado) e a montmorillonita (silicato de alumínio, magnésio e cálcio hidratado). O silício também é um componente essencial da maioria das rochas que formam a crosta terrestre, por exemplo, arenitos e granitos.

Aplicações

O silício é um elemento indispensável em várias indústrias. A areia quartzosa e a argila, por exemplo, são importantes constituintes na

produção do cimento *portland*. É também utilizado para a produção de ligas metálicas, de silicones e de cerâmicas industriais e, por ser um material semicondutor abundante, tem um interesse muito especial na indústria eletrônica, em que é empregado como material básico para a produção de transistores para *chips*, de células fotovoltaicas e de circuitos eletrônicos.

Outros importantes usos do silício são como componente em:

- vidros e cristais;
- carboneto de silício, um importante abrasivo;
- fontes de *laser*.

Uso do silício na geração fotovoltaica

O uso de células fotovoltaicas (Figura 1) para a obtenção de eletricidade vale-se da conversão da energia proveniente da radiação solar. A essa conversão dá-se o nome de efeito fotovoltaico. A primeira geração de células fotovoltaicas é constituída por células de silício cristalino, que consistem de uma lâmina de silício na qual é formada uma junção metalúrgica P-N.¹

O efeito fotovoltaico foi descoberto, em 1839, por Edmond Becquerel (1820-1891). Entretanto, só após 1883 as primeiras células fotovoltaicas foram construídas, por Charles Fritts (1850-1903), que cobriu o selênio semicondutor com uma camada extremamente fina de ouro, de modo a formar junções. Atualmente, cerca de 89% das células fotovoltaicas são produzidas com silício.

O silício – elemento semicondutor – possui quatro elétrons em sua última camada, compartilhados por ligações covalentes sem liberdade de movimentação. O silício não é um bom condutor de eletricidade. Quando o silício é dopado com fósforo (elemento do Grupo V da Tabela Periódica), por exemplo, que tem cinco elétrons na última camada, restará um elétron livre ou não compartilhado. Uma pequena energia é capaz de movimentar

¹ Denomina-se junção P-N a estrutura fundamental dos componentes eletrônicos comumente denominados semicondutores, principalmente diodos e transistores. É formada pela junção metalúrgica de dois cristais, geralmente silício e germânio, de natureza P (positivo) e N (negativo), segundo sua composição em nível atômico. Esses dois tipos de cristais são obtidos ao se doparem cristais de metal com impurezas, normalmente algum outro metal ou composto químico, como o boro e o fósforo [Wikipédia (2007)].

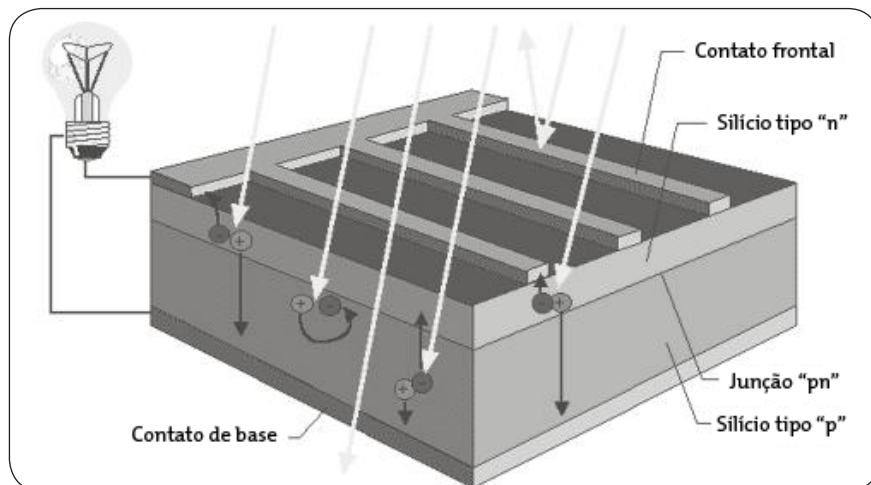
esse elétron. Esse tipo de silício dopado com fósforo é chamado tipo N (N, de carga negativa).

Quando o silício é dopado com boro (elemento do Grupo III da Tabela Periódica), que tem três elétrons na última camada, restará uma lacuna (ausência elétrons) para ser ocupada por um elétron. Constitui-se, assim, um silício do tipo P (P, de carga positiva).

Na junção P-N, ocorre um desequilíbrio de cargas e, conseqüentemente, um campo elétrico é formado.

A incidência de luz (fótons) excita os elétrons, o que os faz fluir de um lado a outro. Esse fluxo de elétrons produz uma corrente elétrica e uma diferença de potencial elétrico. Assim funciona a geração fotovoltaica.

Figura 1 | Corte transversal de uma célula fotovoltaica



Fonte: Elaboração própria, com base em Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (Cepel).

O conjunto de células fotovoltaicas chama-se placa fotovoltaica. As placas fotovoltaicas baseadas em silício não são as mais eficientes. A eficiência teórica fotovoltaica de uma célula de silício chega a 33%. O rendimento de conversão de uma célula comercial produzida com silício monocristalino é de 18% a 20%, enquanto o da célula com silício multicristalino é de 15% a 16%. O melhor material para aplicação fotovoltaica é composto de arsenieto de gálio. Entretanto, o silício é muito mais viável economicamente, já que o gálio é um elemento escasso.

O SiGS – rotas tecnológicas

O silício comercial é obtido a partir da sílica de alta pureza em forno de arco elétrico pela redução² do dióxido de silício (SiO_2) com eletrodos de carbono a uma temperatura superior a 1.900°C .

O silício líquido se acumula no fundo do forno, de onde é extraído e resfriado. O silício produzido por esse processo é denominado metálico ou metalúrgico e apresenta um grau de pureza de até 99,5%.

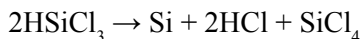
Para a construção de dispositivos semicondutores, é necessário um silício de maior pureza, que pode ser obtido por métodos físicos ou químicos.

Os métodos físicos de purificação do silício metalúrgico baseiam-se na maior solubilidade das impurezas contidas no silício líquido, de forma que este se concentre nas últimas zonas solidificadas. O primeiro método, usado de forma limitada para construir radares durante a Segunda Guerra Mundial, consiste em moer o silício de forma que as impurezas se acumulem nas superfícies dos grânulos, dos quais, por dissolução ácida, obtém-se um pó mais puro. A fusão por zonas, o primeiro método de obtenção industrial, consiste em fundir a extremidade de uma barra de silício e, depois, deslocar lentamente o foco de calor ao longo da barra, de modo que o silício vai se solidificando com uma pureza maior, em razão do arrasto, na zona fundida, de grande parte das impurezas. O processo pode ser repetido várias vezes até se obter a pureza desejada, cortando-se, então, a extremidade em que se acumulam as impurezas.

Os métodos químicos de purificação do silício atualmente empregados atuam sobre um composto de mais fácil purificação, que se decompõe para a obtenção do silício. Os compostos mais usados são o triclorossilano (HSiCl_3), o tetracloreto de silício (SiCl_4) e o silano (SiH_4).

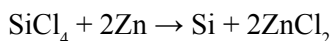
No **processo Siemens** de purificação, as barras de silício reduzido ou metalúrgico (cujo grau de pureza chega até a 99,5%) são expostas, à temperatura de 1.150°C , ao gás triclorossilano, que se decompõe e deposita o silício puro nas barras, fazendo com que se atinja uma pureza aproximada de 99,9999999%. A decomposição do triclorossilano se dá segundo a seguinte reação:

² Redução é diminuição algébrica da carga formal ou do número de oxidação de uma espécie química. Forçosamente, isso se dá através da transferência de elétrons vindos de outra espécie química [Wikipédia (2004)].



O silício obtido por esse método e por outros similares apresenta uma fração de impurezas de uma parte por bilhão ou menos e é denominado silício policristalino.

O **processo DuPont** consiste em reagir tetracloreto de silício, à temperatura de 950°C, com vapores de zinco, na reação:



Esse método, entretanto, está repleto de dificuldades (por exemplo, o cloreto de zinco, subproduto da reação, solidifica-se e provoca a obstrução das linhas de produção), por isso foi abandonado em favor do processo Siemens.

O silício policristalino pode ser produzido em diferentes graus de pureza. O silício de grau eletrônico (SiGE) apresenta o mais alto grau de pureza e é utilizado para a fabricação, pelo **método Czochralski**, do silício monocristalino, que é usado nas indústrias de semicondutores e fotovoltaica. Esse silício de alta pureza requer mais energia para sua purificação em comparação com o SiGS, de pureza inferior, que é utilizado para fabricar lingotes ou faixas policristalinas. A vantagem do silício monocristalino reside em resultar em módulos de mais alta eficiência quando comparado ao silício policristalino.

Pelo fato de a indústria fotovoltaica permitir o uso de silício menos puro do que a indústria de semicondutores, os passos da rota química tradicional foram modificados para consumir menos energia. A destilação, nesse caso, pode ser conduzida mais facilmente e a deposição do silício pode ser feita em um reator de leito fluidizado, em vez de em um reator de tipo Siemens.

Outra possibilidade é a purificação do silício de grau metalúrgico (SiGM) por meio de rota metalúrgica para a produção do chamado silício de grau metalúrgico melhorado (SiGMM), a partir do qual se obtém o SiGS [De Wild-Scholten (2008)].

O mercado fotovoltaico e o mercado do silício cristalino

A energia fotovoltaica é uma das principais fontes renováveis a despontar como alternativa às fontes tradicionais de geração de energia.

A Europa é líder em capacidade de geração acumulada e responde por aproximadamente 70% da capacidade mundial. Em 2012, na União Europeia,

a energia fotovoltaica apresentou a maior expansão em termos de adição de nova capacidade instalada entre os diversos meios de geração de energia elétrica, com adição de 16,7 GW de capacidade, contra 11,7 GW de energia de geração eólica e 5,0 GW de geração a gás (saldo líquido, incluindo desmobilizações), segundo dados da European Photovoltaic Industry Association [EPIA (2013)]. Para ter uma referência da dimensão desse aporte de capacidade, cita-se a Hidrelétrica de Itaipu, no Brasil, que possui capacidade de 14 GW de geração.

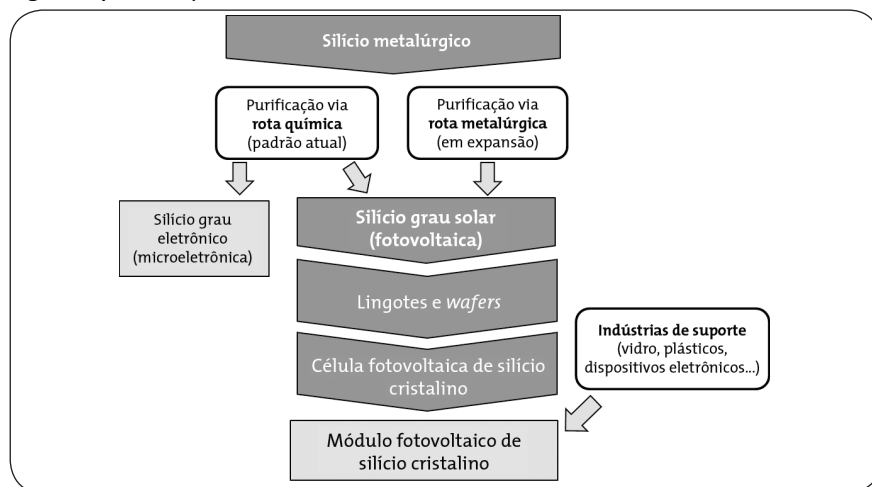
Ainda segundo dados da EPIA, a capacidade de geração fotovoltaica acumulada mundial superou a marca de 100 GW, volume capaz de gerar 110 TWh anualmente, suficiente para suprir o consumo de 30 milhões de residências europeias.

A partir da rápida expansão observada na última década, a indústria fotovoltaica é, atualmente, o principal demandante do silício metálico produzido mundialmente, superando em larga escala a demanda voltada para a indústria de semicondutores.

A cadeia fotovoltaica

A indústria fotovoltaica é composta pelas empresas envolvidas nas diversas etapas de produção de sistemas fotovoltaicos, como mostrado pela Figura 2.

Figura 2 | Cadeia produtiva da indústria fotovoltaica



Fonte: Elaboração própria.

A cadeia é composta principalmente pelas empresas responsáveis pela produção de módulos, células, *wafers* e SiGS. A indústria inclui, também, os produtores dos demais componentes que integram o sistema de geração (baterias, controladores de carga e inversores), a exemplo das brasileiras Moura e Weg. O elo final da cadeia é o investidor que decide pela aquisição dos sistemas fotovoltaicos, a partir da análise dos ganhos potenciais com a geração da energia.

Os módulos fotovoltaicos são formados por células, produzidas a partir dos *wafers* (lâminas) de silício cristalino, que, por sua vez, derivam de processos de cristalização do SiGS.

A produção mundial de silício cristalino, estimada em 228 mil toneladas em 2013, é muito concentrada em um número pequeno de empresas, as quais respondem por 90% da produção total. Os principais líderes em produção são as empresas Wacker Chemie (Alemanha), Hemlock (EUA), GCL Solar (China) e OCI Company (Coreia do Sul).

Já a produção de *wafers* tende a ser mais pulverizada, enquanto a produção de células é muito concentrada na China, liderada pela Suntech Power, que também é a maior produtora mundial de módulos. Em geral, a montagem do módulo é realizada nas unidades produtoras de células, sendo estas as etapas com maior ocorrência de verticalização na cadeia produtiva. Em alguns casos, a montagem pode ser realizada em unidades menores próximas aos mercados consumidores, a fim de reduzir o custo de transporte.

Trata-se de uma cadeia pouco verticalizada, com fluxo importante de comércio entre as diversas etapas, o que é refletido na alternância de posição das empresas entre as líderes de produção em cada etapa.

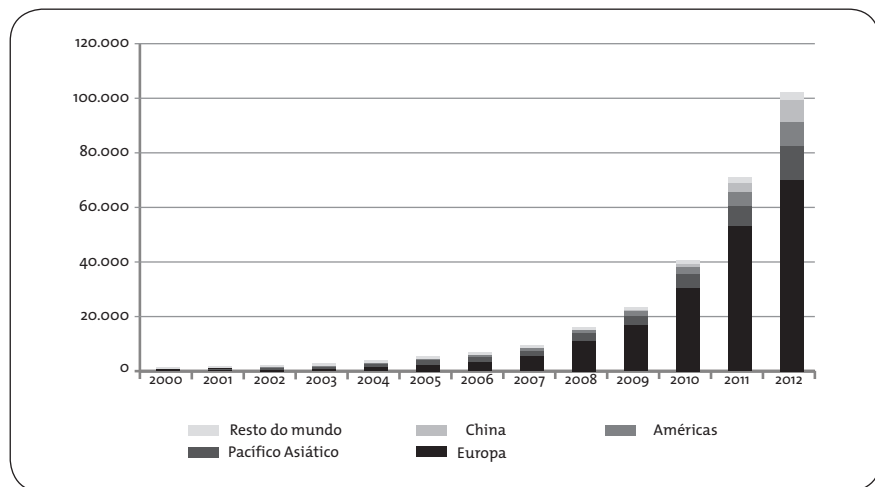
A cadeia tem vivenciado uma situação de sobreoferta nos últimos anos, o que tem pressionado as margens e elevado a pressão sobre os custos, levando à migração de unidades produtivas para países asiáticos, com custos mais competitivos.

Somando-se a isso o avanço da política chinesa de desenvolvimento interno da tecnologia fotovoltaica, o mercado deverá observar, nos próximos anos, uma concentração ainda maior da cadeia em produtores chineses e de demais países asiáticos.

Evolução da energia fotovoltaica e da demanda por silício de alta pureza

O mundo e, principalmente, a Europa assistiram, a partir de 2000, a uma rápida evolução na geração de energia fotovoltaica, com um crescimento médio anual de 44% da capacidade instalada acumulada entre 2001 e 2012. O Gráfico 2 apresenta a evolução da capacidade instalada acumulada mundialmente.

Gráfico 2 | Evolução da capacidade instalada acumulada de potência fotovoltaica (em MW), 2000-2012



Fonte: EPIA (2013).

A expansão da capacidade acumulada, que se deu em larga escala na Europa, é resultado de incentivos de diversos países na busca de uma matriz energética mais limpa e renovável, avanços na regulação voltada para geração e distribuição da energia gerada e tecnologias aplicadas à produção, com a consequente redução nos custos dos equipamentos.

A renovação da matriz energética através de fontes de energia limpas e renováveis é uma estratégia consolidada na busca conjunta da redução de emissões de CO₂ e consequentes impactos ambientais. Assim, programas de incentivos têm sido utilizados para encorajar a indústria fotovoltaica a atingir a escala necessária para competir com outras fontes de geração de energia. Tais programas possuem ainda outras mo-

tivações, como a promoção de independência energética e o domínio da tecnologia aplicada.

Esses programas, associados à definição de regras claras para a geração e comercialização e à redução progressiva do custo de geração, levaram ao crescimento robusto da nova capacidade instalada a cada ano, com reflexo direto na elevação da demanda por SiGS, o qual representa atualmente 90% da demanda total mundial por silício cristalino. Em 2012, a demanda mundial pela indústria fotovoltaica foi de aproximadamente 6,5 vezes a demanda da indústria de semicondutores.

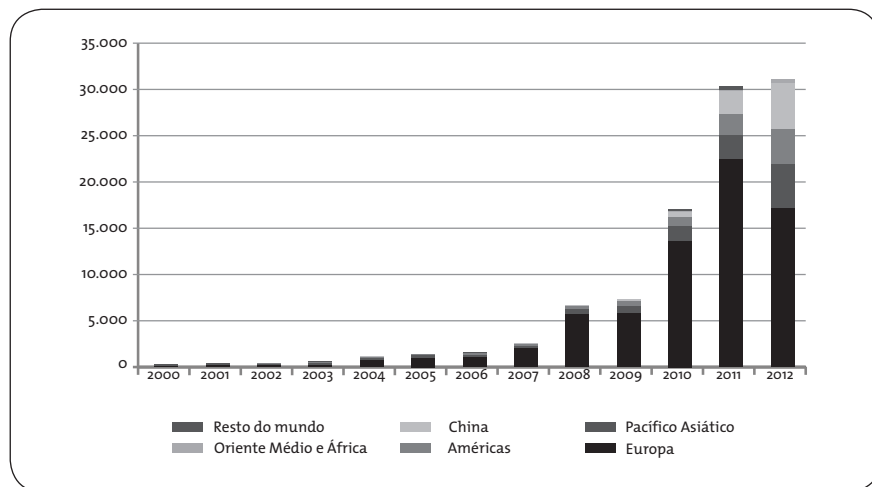
A evolução ocorrida nos últimos anos demonstra uma dependência muito grande do volume anual de novas instalações de sistemas de geração fotovoltaicos em relação aos programas de incentivos adotados. Como exemplo, o mercado observou taxas explosivas de crescimento entre 2004 e 2011, suportadas principalmente pela expansão em dois países, Alemanha e Itália, como reflexo de elevados incentivos implementados por ambos. Por conta disso, a projeção da demanda futura é um grande desafio para os analistas, que constantemente subestimam a demanda real observada a cada ano.

A evolução irregular da demanda, associada ao longo prazo e elevado investimento para implantação de novas plantas, tem levado historicamente a um comportamento cíclico do mercado, alternando entre períodos de escassez e excesso de oferta, com reflexo direto nos preços do silício, que, por sua vez, replicam esse comportamento cíclico, com elevada amplitude entre os preços máximos e mínimos nos últimos anos.

O cenário recente do mercado de silício foi marcado por uma baixa taxa de crescimento de novas capacidades em potência fotovoltaica. Segundo dados de EPIA (2013), o volume instalado no mundo, em 2012, cresceu apenas 2,32% (Gráfico 3) em relação ao ano anterior, enquanto na Europa houve no mesmo ano uma redução de 23,43%, parcialmente explicada por uma relativa estabilização do mercado alemão e pela queda brusca das novas instalações na Itália, após o boom verificado em 2011.

Assim, o mercado observou uma queda da participação da Europa em 2012, o que deve ser uma tendência também para os próximos anos, com crescimento mais acelerado nos países com maior potencial de geração solar (maiores taxas de irradiação) em comparação com um mercado europeu mais maduro e menos impulsionado por políticas de governo.

Gráfico 3 | Acréscimo anual de capacidade em potência fotovoltaica (em MW), 2000-2012



Fonte: EPIA (2013).

Para os próximos anos, são projetados cenários considerando tanto o mercado atuando livremente como dirigido por políticas de incentivo, o que demonstra o quanto, no estágio atual, o mercado ainda é influenciado pelas decisões políticas, enquanto o desenvolvimento pelas leis de mercado depende da redução dos preços dos sistemas de geração, a exemplo do ocorrido em 2012.

Considerando a realidade atual de adoção de políticas de governo voltadas para a geração de energia fotovoltaica, espera-se um crescimento da demanda por silício cristalino em torno de 20% ao ano de 2014 a 2017, alcançando um volume em torno de 250 mil toneladas em 2014 e quatrocentas mil toneladas em 2017, de acordo com dados divulgados na apresentação de Schmid Silicon Technology no V Congresso Brasileiro de Energia Solar, realizado no Recife, de 31 de março a 3 de abril de 2014.

Oferta

Impulsionado pelos programas de incentivos e pelo crescimento acelerado da nova capacidade instalada em 2007 (158%) e em 2010 (130%), o mercado observou uma grande elevação da oferta nas diversas etapas da cadeia fotovoltaica nos últimos anos.

Segundo relatório de junho de 2012 da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (Abinee) [Abinee (2012)], ao fim de 2011 a capacidade anual de produção de células fotovoltaicas era de 57,9 GW, enquanto a demanda por nova capacidade nesse ano foi de 30,4 GW. As taxas de crescimento da oferta situaram-se entre 36% e 120%, de 2007 a 2011, notando-se maior crescimento na Ásia, com China e Taiwan respondendo, juntas, por 68% da oferta mundial em 2011.

A partir do aprofundamento da crise iniciada em 2008, principalmente na Europa, o mercado observou uma redução da taxa de crescimento da demanda, o que agravou o excesso de capacidade da indústria, levando à mais acentuada reversão observada no setor. Segundo Meza (2014), em 2013 os gastos com equipamentos para geração solar reduziram-se para US\$ 1,73 bilhão, o menor valor em oito anos, em contraste com o pico de gastos de aproximadamente US\$ 13 bilhões em 2011. O excesso de capacidade levou também à queda acentuada dos preços dos sistemas de geração nos últimos anos, causando o fechamento de fábricas de células menos competitivas, obrigadas a deixar o mercado.

Com base nos dados de EPIA (2013), haveria uma sobrecapacidade ainda maior para produção do silício cristalino, o que justificaria a queda mais acentuada verificada nos preços. O pico dos gastos com equipamentos e a consequente elevação dos preços do silício cristalino levaram ao aumento da capacidade produtiva, em um cenário que já era de sobreoferta de sistemas de geração. O excesso de capacidade para produção de silício levou à queda significativa das taxas de utilização mesmo dos grandes produtores de baixo custo, ocasionando queda acentuada dos preços.

A elevada disponibilidade de oferta de silício e a difusão de tecnologias de purificação mundialmente configuram um mercado muito competitivo, de margens operacionais reduzidas. Além disso, a expansão futura da geração de energia fotovoltaica depende da competitividade dessa fonte em relação às demais fontes de energia, o que pressiona ainda mais a indústria a reduzir os custos de produção dos sistemas geradores.

A queda do preço da energia solar, possibilitada pela queda dos custos dos sistemas de geração, observada ao longo dos anos, gera um otimismo em relação ao alcance futuro da paridade de preços com formas convencionais baseadas em combustíveis fósseis, o que levaria a enorme expansão do mercado fotovoltaico. Segundo o prêmio Nobel de Economia

Paul Krugman [Krugman (2011)], “se a tendência de queda de preços continuar – e parece que de fato está se acelerando –, em poucos anos atingiremos o ponto em que a eletricidade gerada pelos módulos solares se torna mais econômica que a eletricidade gerada pela queima de carvão”. Essa expectativa e a busca do domínio das tecnologias de purificação e fabricação de mais baixo custo podem ser consideradas fator indutor da oferta de silício cristalino.

Em 2012, o preço de SiGS atingiu o valor mínimo de US\$ 15,35/kg, e os principais produtores de silício cristalino, Wacker Chemie (Alemanha), Hemlock Semiconductor (EUA), GCL Solar (China) e OCI Chemical Corporation (Coreia do Sul), responderam, juntos, por mais de 60% da produção mundial. A China é o maior produtor mundial de silício cristalino, com produção em torno de 70 mil toneladas em 2012, voltada para o atendimento da demanda interna da indústria chinesa, que concentra a produção de células fotovoltaicas, liderada pela Suntech. A produção dos demais países, após atendimento de suas demandas internas, é parcialmente exportada para fabricação de células e módulos chineses.

Por fim, pode-se constatar que os anos de 2011, 2012 e 2013 foram caracterizados por um enorme desequilíbrio do mercado gerado por escalada de elevação de oferta, em um contexto de pico da demanda pela geração fotovoltaica em 2010, não sustentada nos anos posteriores. Para os próximos anos, espera-se que o crescimento da oferta ao longo da cadeia ocorra em patamares mais sustentáveis, amenizando os desequilíbrios entre oferta e demanda observados historicamente.

Nos itens “Preços” e “Tendências de preços e custos”, a seguir, faz-se uma análise mais detalhada do comportamento recente dos preços e custos para uma avaliação das tendências do mercado de silício.

Preços

Nos primeiros quatro meses de 2011, em função da expectativa favorável de aumento da demanda por energia fotovoltaica, o estoque mundial de painéis atingiu um volume equivalente a 10 GW. Nesse processo de estocagem, toda a cadeia produtiva sofreu pressão de alta de preços, especialmente os preços do silício cristalino, produto de maior consumo na fabricação de módulos fotovoltaicos. Todo esse movimento, entretanto, deu-se em uma estrutura de oferta que já apresentava sobrecapacidade.

Na segunda metade do ano, três das maiores produtoras mundiais de silício cristalino colocaram em marcha novas capacidades. Além disso, a Noruega começou a aumentar a oferta de *wafers* no mercado *spot*, fazendo com que os preços desses produtos e, consequentemente, do silício cristalino comessem uma trajetória de queda.

Como consequência desse movimento, muitas pequenas empresas chinesas que operavam, em sua maioria, no mercado *spot* e apresentavam custos de produção na casa dos US\$ 30,00/kg começaram a sair do mercado, sendo substituídas por capacidades com maiores escalas e menores custos médios de produção.

É interessante observar uma alteração na correlação de preços e de volume de importação de silício cristalino da China. Antes desse movimento, à medida que aumentavam as importações chinesas, o preço *spot* do silício cristalino aumentava. Agora, apesar do aumento das importações, o preço *spot* tem apresentado queda. Empresas de custos de produção competitivos, por exemplo, a Hemlock Semiconductor e a REC Silicon, dos EUA; a OCI, da Coreia do Sul; e a Wacker, da Alemanha, têm suprido parcela do mercado doméstico chinês, em substituição às empresas locais menores.

Cabe destacar, que, em outros países, empresas menos competitivas também pararam a produção, como na Itália, na Rússia e até mesmo na Coreia do Sul.

Apesar de os grandes produtores operarem com contratos de longo prazo, os preços desses contratos têm sido influenciados pelo preço *spot*. Ainda em 2011, os principais fornecedores renegociaram preços com seus clientes refletindo o ajuste dos preços *spot*.

Em 2012, um dos principais movimentos do mercado foi o de desova de estoques. Empresas chinesas produtoras de silício cristalino, que abandonaram as operações, começaram a se desfazer de seus inventários, para obterem liquidez, vendendo-os no mercado *spot*, a baixos preços, pressionando ainda mais os preços que já se encontravam muito abaixo da média dos últimos anos. Como resultado, os níveis de utilização da capacidade instalada (Nuci) de várias plantas produtoras apresentaram quedas expressivas. Na Coreia do Sul, por exemplo, a OCI chegou a operar em um nível de utilização da capacidade de 40%, no fim do ano.

Durante o ano de 2012, o preço *spot* internacional caiu 52%, mesmo depois da queda de 58% observada em 2011, chegando a fechar o ano no valor de US\$ 15,35/kg, praticamente a metade dos preços dos contratos de longo prazo.

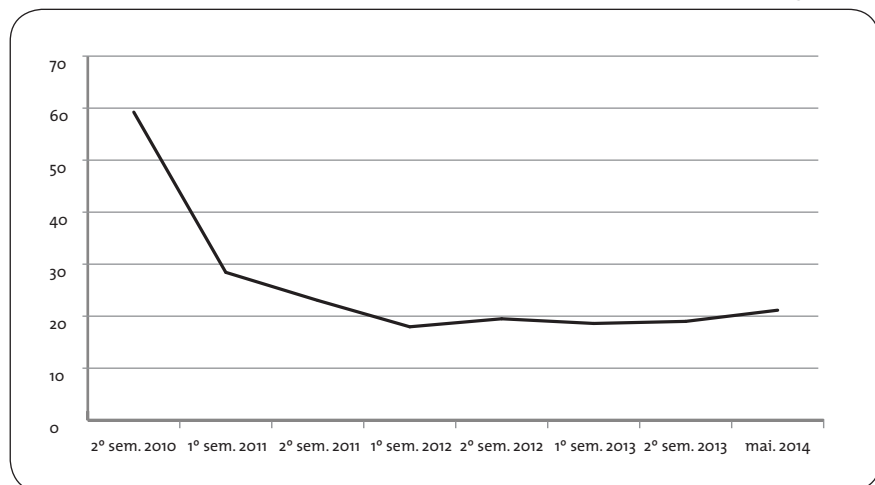
A queda severa nos preços fez com que se iniciasse uma segunda onda de fechamento de unidades, principalmente na Coreia do Sul e na China.

Em novembro de 2011, o Departamento de Comércio dos EUA iniciou um processo *antidumping* relativo aos preços de módulos fotovoltaicos contendo células fabricadas na China. Em janeiro de 2012, o Ministério de Comércio da China solicitou uma investigação *antidumping* e antissubsídio na produção norte-americana e coreana de silício cristalino.

O resultado da ação norte-americana foi anunciado em outubro de 2012. Esperando que as ações chinesas fossem anunciadas em abril de 2013, houve antecipação das importações de silício por parte de empresas chinesas, fazendo com que o preço *spot* batesse o valor de US\$ 18,60/kg. Como o Ministério de Comércio Chinês postergou o anúncio das medidas, o preço cedeu um pouco, chegando a US\$ 16,60/kg em julho, mas fechou o ano de 2013 em US\$ 19,00/kg.

O Gráfico 4, a seguir, apresenta o movimento recente dos preços *spot* do silício policristalino.

Gráfico 4 | Evolução do preço médio *spot* do silício policristalino (em US\$/kg)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados da PVInsights (2014).

Tendências de preços e custos

Em uma distribuição cumulativa de custos de produção de SiGS, incluindo todas as tecnologias disponíveis, em 2012, das cerca de 350 mil toneladas de capacidade instalada, aproximadamente 55% operaram com custos de produção abaixo de US\$ 20,00/kg. Com uma demanda mundial por SiGS, em 2012, de 189 mil toneladas, ou seja, com um Nuci de 54%, o preço de 2012 fechou próximo a esse valor (custos marginais de produção).

A indústria fechou o ano de 2013 com uma capacidade instalada aproximada de 290 mil toneladas de SiGS e um Nuci de 76%. No ano, cerca de 77% da capacidade industrial operou com custos de produção abaixo de US\$ 18,00/kg, fazendo com que os preços fechassem próximos a esse valor (US\$ 19,00/kg).

Graças ao movimento anteriormente apresentado pelo mercado, a tendência é que novas instalações, que estão substituindo instalações menos competitivas, venham a operar com custos abaixo desses valores. Em 2014, deverão entrar em produção cerca de 60 mil toneladas, com baixos custos. Cabe destacar uma pequena reação nos preços, nos primeiros meses de 2014, fazendo o do silício *spot* atingir o valor de US\$ 21,00/kg.

Esperam-se, para os próximos anos, custos marginais entre US\$ 15,00/kg e US\$ 17,00/kg, podendo os preços, em cenário de baixa demanda, assumir esses valores.

Mesmo em cenários mais otimistas, dificilmente, nos próximos três anos, os preços *spot* chegarão a valores superiores a US\$ 30,00/kg.

Brasil – oportunidades e perspectivas

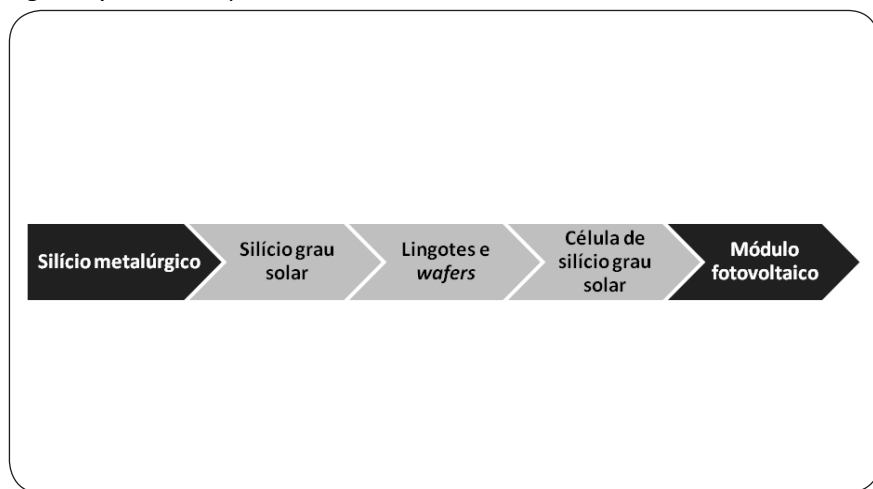
O Brasil é considerado um país com potencial elevado para geração de energia fotovoltaica, em virtude da oferta elevada de energia solar, representada pelos bons níveis de irradiação solar apurados em seu território. Segundo dados disponíveis no *site* do projeto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA), o Brasil é o quinto país com maior potencial solar no mundo, de 24.993.114.080 MWh/ano, diante de 618.698.987 MWh/ano da Alemanha, país com a maior capacidade instalada de geração fotovoltaica (36 GW, em 2013).

Dentre os principais benefícios advindos da expansão da energia fotovoltaica no Brasil, destacam-se:

- **Sinergia com a carga:** no Brasil, os maiores picos de utilização de energia são registrados em dias de intenso calor, por causa do uso massivo de equipamentos de ar condicionado. Os dias mais quentes são, em geral, dias ensolarados; portanto, a geração fotovoltaica levaria a um aumento da carga gerada coincidente com aumento da demanda.
- **Complementaridade com a geração hidrelétrica:** mais de 70% de toda a eletricidade gerada no Brasil é proveniente da geração hidrelétrica, a qual depende dos níveis dos reservatórios, determinados pelo volume de chuvas em cada período. Logo, em períodos de maior escassez de chuvas e, conseqüentemente, com maior incidência de radiação solar, a maior produtividade da geração fotovoltaica poderia compensar parcialmente quedas de produção das hidrelétricas.
- **Empregos e geração de renda em regiões de baixo desenvolvimento:** a quantidade de empregos gerados pela indústria fotovoltaica é significativa quando comparada à das outras fontes. A maior parte dos empregos é concentrada em empresas de instalação dos sistemas, enquanto a fabricação dos módulos seria responsável por aproximadamente 25% dos empregos gerados. O potencial de geração de emprego é especialmente importante no caso da geração fotovoltaica no Brasil, pelo fato de as regiões com maior irradiação e, portanto, maior potencial de geração solar, serem, em muitos casos, regiões muito pobres, com baixo nível de desenvolvimento e carentes de empregos. Dessa forma, as instalações fotovoltaicas representariam uma atividade dinamizadora da economia dessas regiões, graças à geração de empregos diretos e indiretos, resultantes da injeção de renda.

O setor fotovoltaico brasileiro conta com uma capacidade instalada acumulada em torno de somente 20 MWp (megawatts-pico) e pode ser caracterizado pela presença de empresas atuantes apenas nas extremidades da cadeia: produção de silício metalúrgico e montagem de módulos.

A Figura 3 mostra de forma simplificada a cadeia da indústria fotovoltaica partindo do silício metalúrgico.

Figura 3 | Cadeia simplificada da indústria fotovoltaica

Fonte: Elaboração própria.

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de silício metalúrgico, com produção atual de 170 milhões de toneladas, 8% da produção mundial em 2013. Cerca de 82% da produção nacional é voltada para a exportação.

No Brasil, concentram-se as maiores reservas mundiais de quartzo de alta qualidade, no qual é encontrado o óxido de silício processado para obtenção do silício metalúrgico. A qualidade das jazidas brasileiras é um dos fatores de competitividade das indústrias brasileiras, que exportam grande parte da produção para abastecimento dos fabricantes de células no exterior.

O silício metalúrgico é comercializado a US\$ 2,00/kg a US\$ 3,00/kg, enquanto o silício cristalino foi comercializado em torno de US\$ 20,00/kg ao fim de 2013, um valor da ordem de dez vezes maior. A produção de silício cristalino no Brasil ainda é inexistente, assim como a produção de células, tendo em vista as economias de escopo envolvidas nos processos de fabricação. No entanto, há alguns projetos em curso para desenvolvimento e internalização de tecnologias de purificação, os quais poderão começar a colher resultados nos próximos anos.

O setor fotovoltaico conta com apenas um fabricante de módulos: a empresa Tecnometal, que iniciou sua produção em 2010, com capacidade de produção de 25 MWp ao ano. A empresa importa as células e faz a montagem dos módulos em sua planta local. Este pode ser o início do de-

envolvimento da cadeia fotovoltaica brasileira, a exemplo do ocorrido na China – que iniciou sua produção pelas etapas finais da cadeia e atualmente lidera o mercado mundial.

A indústria fotovoltaica pode ser considerada um setor estratégico, seja pelos benefícios aqui expostos, seja pela trajetória de aumento da eficiência e queda dos custos de implantação dos sistemas de geração e consequente expectativa de avanço em direção a uma energia cada vez mais competitiva em relação às demais fontes. O setor tem sido alvo de políticas de incentivos de diversos países que vislumbram a evolução para um mercado de grandes cifras. Trata-se de um mercado em desenvolvimento, no qual o Brasil deve avançar para a produção ao longo de toda a cadeia e evitar a dependência externa nos elos de maior valor, a exemplo do ocorrido na indústria eólica.

Relatórios de consultorias internacionais, em 2014, já demonstram a paridade de rede da energia fotovoltaica (custo de geração equivalente ao preço oferecido na rede) na Alemanha e na Itália. O Brasil é considerado uma nação com elevado potencial, contudo os altos preços de instalação seriam o maior obstáculo para o desenvolvimento da energia solar no país. A redução dos preços de instalação, no entanto, somente é possível a partir da consolidação de demanda mínima capaz de atrair novos agentes para produção e distribuição dos sistemas de geração no Brasil.

Dessa forma, o aumento da demanda da indústria fotovoltaica deve ser incentivado, o que vem ocorrendo em um movimento bem recente de participação da energia solar em leilões de geração de energia e estímulo à inserção da energia solar no mercado de geração distribuída, caracterizada por plantas de pequeno porte localizadas próximas aos centros de carga, sem depender, necessariamente, do sistema nacional de transmissão.

O Brasil apresenta grande potencial para inserção da geração fotovoltaica na forma de sistemas de geração distribuída, que ganharam maior destaque a partir do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), de 2004. O programa, cujo objetivo era aumentar a participação da energia eólica, da biomassa e da energia gerada em pequenas centrais hidrelétricas (PCH) através de projetos conectados ao Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN), não incluiu a energia solar, por esta apresentar, naquele momento, custo de produção consideravelmente superior às demais fontes.

A partir de 2004, foram estabelecidas as primeiras diretrizes para geração e comercialização da energia proveniente de geração distribuída. Em

2012, como resultado de consulta e audiência públicas realizadas em 2010 e 2011, respectivamente, com objetivo de reduzir barreiras à geração distribuída, a Resolução Normativa 482 estabeleceu as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e criou o sistema de compensação de energia elétrica correspondente (*net metering*).

O sistema definido na Resolução Normativa 482 tem a finalidade de regular a troca de energia entre concessionária e usuários/geradores. Com o sistema, o consumidor pode compensar seu consumo de energia a partir da energia injetada à rede com micro ou minigeração distribuída, que é abatida no momento da cobrança. O governo lançou em março de 2014 um caderno para orientação ao público sobre o sistema. Espera-se que o desenvolvimento do sistema impulse nos próximos anos uma expansão mais acelerada de projetos de micro e minigeração de consumidores comerciais e residenciais, para os quais o custo de geração fotovoltaica já é bem próximo da tarifa final de energia (paridade de rede).

O ano de 2014 tem sido marcado pelo desabastecimento dos reservatórios de água e problemas para geração hidrelétrica, com a necessidade de acionamento de usinas termelétricas e encarecimento do preço da energia ao consumidor final. Enquanto os grandes projetos de geração não ficam prontos, o governo busca promover projetos de geração menores, o que abre mais espaço para a energia fotovoltaica. As previsões quanto às condições geoclimáticas brasileiras indicam maior ocorrência de situações extremas (como ausência prolongada de chuvas), tornando ainda mais representativo o caráter complementar da energia fotovoltaica no sistema nacional.

Em 27 de dezembro de 2013, o estado de Pernambuco lançou o primeiro leilão específico de energia solar no Brasil, com a contratação de 122,82 MW de geração, em torno de seis vezes mais a capacidade acumulada instalada atual. O leilão garantiu o início da instalação das primeiras seis usinas solares de grande porte no país e estabeleceu um preço mais realista, em média R\$ 228,63/MWh, para futuras concorrências.

A energia solar já havia estreado nos leilões de energia do governo federal realizados no fim de 2013, mas competindo com usinas eólicas e à biomassa. No entanto, o valor máximo estabelecido para a energia vendida nos leilões A-3 (R\$ 126,00/MWh) e A-5 (R\$ 122,00/MWh), na prática, inviabilizava os projetos fotovoltaicos.

Com a realização de leilões específicos, espera-se gerar a demanda mínima necessária para a instalação no Brasil das indústrias atuantes nos elos de maior valor da cadeia fotovoltaica. Ao que parece, o leilão específico para energia solar feito pelo estado de Pernambuco foi apenas o primeiro, pois já há estudos para realização de leilões como esse pelo estado de São Paulo e pelo governo federal. Recentemente, o governo federal anunciou, ainda para outubro de 2014, leilão de energia de reserva, com contratos específicos para energia solar.

De acordo com Maurício Tolmasquim, presidente da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em palestra durante o Energy Summit 2013 [Farid (2013)], a energia fotovoltaica poderá superar todas as projeções de crescimento e registrar um fenômeno de expansão, como ocorrido com a energia eólica. A previsão, que, segundo ele, deverá ser revisada, é de que o país terá uma nova capacidade de 1,4 GWp (gigawatts-pico) instalada nos próximos dez anos. Trata-se de uma previsão muito conservadora, quando comparada à expansão da energia eólica, a qual se encontra em um estágio mais avançado de desenvolvimento no país e deverá alcançar uma capacidade acumulada em torno de 10 GWp em 2015.

Com a evolução da energia fotovoltaica no Brasil, pode-se esperar que o país comece a apresentar uma adição de capacidade fotovoltaica mais expressiva, a exemplo do que já ocorre na Europa, onde a energia fotovoltaica foi responsável por 27,2% da nova capacidade em 2012.

Uma nova capacidade fotovoltaica de 2 GWp, instalada nos próximos dez anos, representaria uma demanda brasileira em torno de 12 mil toneladas de SiGS no período. Considerando um preço médio de US\$ 20,00 a 25,00/kg, tratar-se-ia de um mercado de US\$ 240 milhões-US\$ 300 milhões e um volume de cerca de 1,2 mil toneladas ao ano.

Há, no país, expectativa de implantação de unidades produtoras de SiGS, nos próximos anos, de cerca de oitocentas toneladas ao ano. Inicialmente, deverão ser feitos investimentos em plantas-piloto comerciais de até cem toneladas ao ano, para ajustes e adaptações dos processos desenvolvidos a partir dos resultados de pesquisas que estão sendo desenvolvidas.

Um importante aspecto a ser observado é a redução progressiva dos custos de geração fotovoltaica. Esta tem sido uma realidade, ao passo que tem se elevado o custo de geração do sistema elétrico. O Brasil vive um momento oportuno para o desenvolvimento da indústria fotovoltaica e, diante das

oportunidades vislumbradas, as empresas já estão se engajando em projetos de produção de SiGS no país.

No início da cadeia produtiva, há atores relevantes que já fabricam silício metalúrgico. Os principais são os seguintes: Dow Corning, Liasa, Minasligas e Rima. Dentre esses, destaca-se a iniciativa das brasileiras Minasligas (em parceria com o IPT e o BNDES) e Rima de investir em pesquisa, desenvolvimento e inovação (P,D&I) na rota metalúrgica de produção do SiGS. A Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), em parceria com a brasileira Tecnometal, também está realizando P,D&I na rota metalúrgica, cujo projeto – no âmbito do Fundo Tecnológico (Funtec) – está em análise no BNDES.

Destacam-se, ainda, investimentos da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS) – que possui acordo de cooperação com o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel/Eletronbras) – e do Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (Cetec-MG) em P,D&I de purificação de silício na rota química. Segundo informações no *site* do Cepel, a PUC-RS atingiu em seus painéis solares, em testes laboratoriais, níveis de eficiência energética superiores aos de produtos equivalentes no mercado.

No tocante à produção local de painéis fotovoltaicos, no Brasil, há a Tecnometal, que possui uma linha de produção de 25 MWp ao ano e intenciona expandir sua capacidade produtiva.

Vários grupos estrangeiros estão prospectando o mercado nacional, seja para comercialização de suas tecnologias, seja para a implantação de linhas de produção no país. São exemplos as empresas Oerlikon, SunPower, Saint-Gobain e CEA-Liten.

Apesar do momento oportuno, o desenvolvimento da indústria fotovoltaica ainda enfrenta desafios relacionados à capacidade do sistema de distribuição em receber e gerir um maior volume de energia fotovoltaica, dada a intermitência natural do recurso que causa súbita queda de geração no sistema.

Além disso, a situação do setor elétrico, após a Medida Provisória 579/2012 e em um momento de preços mais elevados da energia no curto prazo, a partir do aumento da geração térmica, tem representado um problema para a sustentabilidade das indústrias de silício metalúrgico. A produção de silício metálico é eletrointensiva, a energia elétrica chega a representar

até 35% dos custos de produção do silício metalúrgico. Há incerteza quanto à energia disponível para negociação futura no mercado livre, o que tem impedido a renovação de contratos de fornecimento de longo prazo, fundamentais para a sustentabilidade das indústrias desse segmento.

A incerteza relacionada à contratação de energia futura pode induzir ao adiamento de projetos de produção do SiGS no Brasil, por meio do desenvolvimento da rota metalúrgica de purificação do silício. A rota metalúrgica beneficia-se da experiência metalúrgica brasileira e os projetos poderão alcançar em pouco tempo um processo competitivo mundialmente.

A inovação brasileira para a produção de SiGS via rota metalúrgica

Até o fim da década de 1990, a fonte de silício para a indústria de painéis fotovoltaicos era de rejeitos gerados na produção do silício empregado na fabricação de circuitos integrados (SiGE, o qual tem aproximadamente 99,9999999% de pureza), já que o nível de pureza do silício exigido na produção de células solares, de 99,999% a 99,9999%, é inferior ao da indústria eletrônica.

No entanto, com o aumento da demanda pela energia solar fotovoltaica, o qual não foi acompanhado pela indústria de semicondutores, houve a necessidade de instalação de unidades cativas para a produção de SiGS, que hoje já supera a produção de SiGE, conforme já visto. Paralelamente, em função da necessidade de redução de custos de produção, iniciou-se uma corrida por processos alternativos de obtenção de SiGS.

Uma primeira consequência desse panorama foram os investimentos que os produtores de SiGE fizeram, na tentativa de adaptar etapas menos onerosas ao processo químico de produção de SiGE, conhecido como processo Siemens-C.

Outra importante consequência foram os investimentos realizados por parte de empresas, institutos e universidades para tentar obter um SiGS a partir da purificação direta do SiGM.

O Brasil não conta com nenhuma indústria química de produção de SiGE, as quais, como mencionado anteriormente, são grandes indústrias químicas e de alta tecnologia, voltadas ao mercado de equipamentos eletrônicos. É importante observar que dificilmente se pode dissociar a indústria de pro-

dução de SiGE da de produção de SiGS pela rota química, já que essa rota é derivada da rota do SiGE, com algumas etapas a menos. Portanto, para a produção de SiGS a partir da rota química, há necessidade de aproveitamento de escala e de escopo de uma unidade de SiGE.

A principal rota de produção do SiGS que está sendo investigada no Brasil é a rota metalúrgica. Na rota metalúrgica, o desafio é muito mais tecnológico do que econômico (como é o caso da rota química), já que as operações envolvidas na purificação do silício por essa rota (por exemplo, fusão, solidificação controlada, refino piro e hidrometalúrgico) são muito mais próximas do que é dominado hoje pelas indústrias brasileiras produtoras de SiGM, facilitando sua adaptação. Além disso, a técnica de purificação até o grau solar não está ainda totalmente dominada, ou seja, ainda há espaço para competição, diferentemente da rota química, em que as empresas que já são produtoras de SiGE levam grande vantagem.

O país conta com institutos de pesquisa que já têm experiência na purificação do silício metalúrgico, podendo-se citar o IPT e a Unicamp.

Contando com o apoio do BNDES, através de recursos do Funtec, dois projetos visando à produção de SiGS solar estão sendo desenvolvidos: (i) um pelo IPT, em parceria com a empresa Minasligas; e (ii) outro pela Unicamp, com a interveniência da Tecnometal.

No projeto que está sendo desenvolvido pelo IPT em parceria com a Minasligas, a rota de purificação está praticamente desenvolvida, faltando apenas definir quais etapas são mais vantajosas do ponto de vista econômico e a qualificação do produto, que será feita por meio das medidas físicas realizadas em lâminas obtidas após a cristalização do silício. Pode-se afirmar que se atingiu o refino pretendido, ou seja, aumento da pureza do silício de 99,5% (SiGM) para um teor maior que cinco noves de pureza (>99,999% – SiGS).

Apesar de ainda haver possibilidade de ajustes ou pequenas alterações nos processos desenvolvidos até o momento, a empresa interveniente Minasligas está iniciando o estudo de viabilidade econômica da rota tecnológica desenvolvida. Cabe ressaltar que a Minasligas submeteu projeto, no âmbito do Plano Inova Energia, pleiteando apoio financeiro a seu plano de negócios, o qual objetivará, em um primeiro momento, a instalação de uma planta-piloto de purificação de silício com capacidade anual de cem toneladas.

Pode-se ainda citar a iniciativa da empresa Solven, que, também no âmbito do Plano Inova Energia, está pleiteando financiamento para a construção de uma planta-piloto com capacidade de produção anual de 72 toneladas de SiGS pela rota metalúrgica e de *wafers*.

É importante destacar que a inovação brasileira no processo de purificação do silício pela rota metalúrgica, além de se ater à questão da eficiência fotovoltaica, deve se preocupar com os custos dos processos em escala industrial, por causa da tendência de preços baixos e do movimento de instalações de novas unidades que estão substituindo instalações menos competitivas e que deverão operar com custos cada vez menores.

O papel do BNDES

A evolução recente observada no setor elétrico brasileiro abre oportunidades para negócios no âmbito de novas fronteiras tecnológicas, incluindo o desenvolvimento da indústria fotovoltaica brasileira. Com a realização dos primeiros leilões fotovoltaicos, espera-se gerar uma demanda capaz de estimular a produção brasileira nos diversos elos da cadeia. A energia solar também acaba de receber impulso gerado pela recente normatização dos critérios de inserção e comercialização da geração distribuída pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

No mercado, há propostas de empresas com planos de negócios para explorar tanto a comercialização de equipamentos (por exemplo, painéis fotovoltaicos) para os consumidores finais quanto a própria implantação de usinas geradoras. Além disso, também estão em curso projetos de desenvolvimento de processos de purificação de silício e produção ao longo da cadeia.

O Programa Inova Energia, lançado em parceria com a Finep – Inovação e Pesquisa e a Aneel, já selecionou projetos para desenvolvimento produtivo em elos de maior valor, como a produção de SiGS, e pode ser o início de um período de apoio crescente a novos projetos na cadeia.

Como principal instituição de financiamento de longo prazo para a realização de investimentos no Brasil, o BNDES possui linhas e programas de financiamento capazes de suportar projetos que visem ao desenvolvimento de processos de fabricação e instalação de plantas produtivas da nascente indústria fotovoltaica no Brasil.

Conclusões

Nos últimos cinco anos, observou-se uma evolução bastante pronunciada de instalações de unidades de potência fotovoltaica em todo o mundo. Esse crescimento, mesmo que se dê a taxas menores que as verificadas nesse período, deve continuar de forma robusta nos próximos anos, ancorado em uma estratégia consolidada de renovação da matriz energética por meio de fontes de energia limpas e renováveis.

Um dos aspectos fundamentais no desenvolvimento da cadeia produtiva fotovoltaica, que tem como etapa de maior desafio tecnológico a produção de SiGS, é a necessidade de se obterem baixos custos de produção, para fazer frente a um cenário mundial de instalação de novas capacidades com custos cada vez menores.

Entre os países com maior potencial solar no mundo, o Brasil, que conta com jazidas de quartzo de alta qualidade – um dos principais fatores de competitividade na produção de silício metalúrgico –, realizou seu primeiro leilão específico e garantiu o início da instalação das primeiras usinas solares de grande porte.

As recentes iniciativas brasileiras para a promoção da energia fotovoltaica, que incluem também o incentivo a projetos de micro e minigeração de consumidores comerciais e residenciais, poderão consolidar demanda mínima capaz de atrair o interesse de investidores para o desenvolvimento da produção nas diversas etapas da cadeia fotovoltaica no país.

A exemplo do ocorrido na China, que iniciou sua produção pelas etapas finais da cadeia e atualmente lidera o mercado mundial, o Brasil pode verticalizar a montante a produção de módulos fotovoltaicos e viabilizar a produção de SiGS em escala, podendo vir a ser um fornecedor desse importante insumo para a geração de energia fotovoltaica.

Referências

ABINEE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA.
Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira. [S.l.]: Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos, jun. 2012.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica*. Brasília: Aneel, mar. 2014, 28 p. (Cadernos Temáticos Aneel).

DE WILD-SCHOLTEN, M. J. *et al.* LCA comparison of the Elkem solar metallurgical route and conventional gas routes to solar silicon. In: EUROPEAN PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY CONFERENCE, 23, 1-5 set. 2008, Valência, Espanha. *Proceedings...* Disponível em: <www.ecn.nl/docs/library/report/2008/m08012.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2014.

EPIA – EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION. *Global market outlook for photovoltaics 2013-2017*. [on-line]: EPIA, 2013. Disponível em: <www.epia.org/fileadmin/user_upload/Publications/GMO_2013_-_Final_PDF.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2014.

FARID, J. Tolmasquim: energia solar fotovoltaica deve ter expansão rápida no Brasil. *Notícias EPE*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). 12 set. 2013. Disponível em: <www.riocapitaldaenergia.rj.gov.br/site/conteudo/Parceiro8Noticia.aspx?C=EWHIjKTCfIs%3D>. Acesso em: 27 mar. 2014.

JUNÇÃO PN. In: Wikipedia. Incluído em: 24 ago. 2007[†]. Disponível em: <pt.wikipedia.org/wiki/Jun%C3%A7%C3%A3o_PN>. Acesso em: 27 fev. 2014.

KRUGMAN, P. HERE COMES THE SUN. *New York Times*, [on-line], The Opinion Pages. 6 nov. 2011. Disponível em: <www.nytimes.com/2011/11/07/opinion/krugman-here-comes-solar-energy.html?_r=0>. Acesso em: 20 mar. 2014.

MEZA, E. New solar PV capital expenditure set to rise in 2015. *PV Magazine*, jan. 2014. Disponível em: <http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/new-solar-pv-capital-expenditure-set-to-rise-in-2015_100014081/#ixzz2ytNioJyR>. Acesso em: 20 mar. 2014.

SCHMID SILICON Technology. *Apresentação*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 5, Recife, 31 mar.-3 abr. 2014.

REDUÇÃO. In: Wikipedia. Incluído em: 2 nov. 2004. Disponível em: <pt.wikipedia.org/wiki/Redu%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 7 abr. 2014.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral commodity summaries*. United States Government Printing Office, Washington,

2014. 199p. Disponível em: <minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2014.

Sites consultados

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA – <creseb.cepel.br/content.php?catid=4>.

SWERA – SOLAR AND WIND ENERGY RESOURCE ASSESSMENT – <en.openei.org/apps/SWERA/>.